

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-017508

(43)Date of publication of application : 17.01.2003

(51)Int.Cl.

H01L 21/338  
H01L 29/06  
H01L 29/78  
H01L 29/786  
H01L 29/812  
H01L 51/00

(21)Application number : 2001-204182

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 05.07.2001

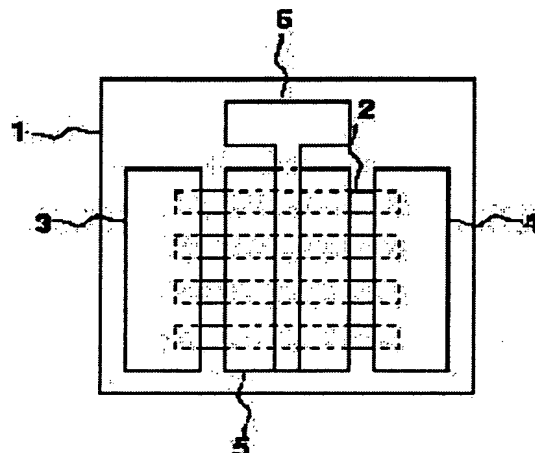
(72)Inventor : NIHEI FUMIYUKI

## (54) FIELD EFFECT TRANSISTOR

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a field effect transistor for controlling or amplifying digital electrical signals or analog electrical signals of very high frequency.

SOLUTION: The field effect transistor, which comprises a channel provided on a substrate, a source electrode connected to a starting end of the channel, a drain electrode connected to an end of the channel, an insulator formed on the channel or on a side surface thereof, and a gate electrode formed on the channel or on the side surface thereof via the insulator, is characterized in that the channel is constituted of a plurality of carbon nanotubes.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

12.08.2003

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the  
examiner's decision of rejection or application converted  
registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of  
rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-17508

(P2003-17508A)

(43) 公開日 平成15年1月17日 (2003.1.17)

(51) Int. Cl.	識別記号	F I	キーワード (参考)
H 0 1 L 21/338		H 0 1 L 29/06	6 0 1 N 5 F 1 0 2
29/06	6 0 1	29/80	B 5 F 1 1 0
29/78		29/78	3 0 1 B 5 F 1 4 0
29/786			6 1 8 B
29/812		29/28	

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 6 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2001-204182 (P2001-204182)

(22) 出願日 平成13年7月5日 (2001.7.5)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 二瓶 史行

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74) 代理人 100082985

弁理士 京本 直樹 (外2名)

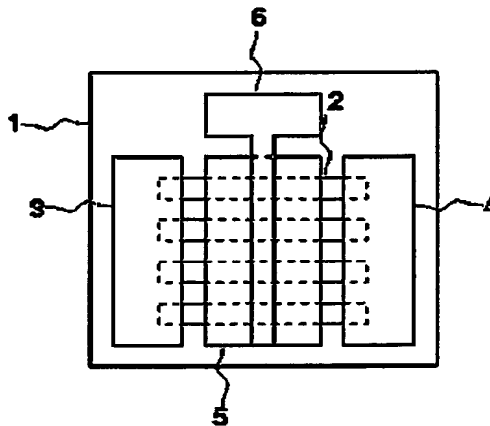
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電界効果トランジスタ

(57) 【要約】

【目的】 非常に高い周波数のデジタル電気信号あるいはアナログ電気信号を制御あるいは増幅するための電界効果トランジスタを提供する。

【構成】 基板の上に設置されたチャネルと、チャネルの始端に接続されたソース電極と、チャネルの終端に接続されたドレイン電極と、チャネルの上あるいは側面に設置された絶縁体と、絶縁体を介してチャネルの上あるいは側面に設置されたゲート電極からなる電界効果トランジスタにおいて、チャネルが複数のカーボンナノチューブにより構成される事を特徴とする電界効果トランジスタ。



(2)

特開2003-17508

1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 荷電粒子が走行するチャンネルと、それぞれチャンネルの一部に接続されるソース領域、ドレイン領域と、チャンネルと電気的に結合するゲート電極からなる電界効果トランジスタにおいて、チャンネルがカーボンナノチューブで構成される事を特徴とする電界効果トランジスタ。

【請求項2】 カーボンナノチューブの電気特性が半導体型である事を特徴とする請求項1に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項3】 カーボンナノチューブに単層カーボンナノチューブあるいは多層カーボンナノチューブを含み、且つ、カーボンナノチューブに螺旋性がある場合あるいは無い場合を含む事を特徴とする請求項1または2に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項4】 カーボンナノチューブに荷電粒子供与体が添加されている事を特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項5】 荷電粒子供与体はアルカリ金属である事を特徴とする請求項4に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項6】 荷電粒子供与体はハロゲン原子あるいはハロゲン分子である事を特徴とする請求項4に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項7】 カーボンナノチューブが荷電粒子供給体を内包している事を特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項8】 カーボンナノチューブに内包されている荷電粒子供与体がフラーレン類である事を特徴とする請求項7に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項9】 フラーレンは化学修飾されている事を特徴とする請求項8に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項10】 フラーレンは金属あるいは分子を内包している事を特徴とする請求項8または9のいずれか1項に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項11】 ゲート電極が絶縁膜を介してチャンネルに接続されている事を特徴とする請求項1ないし10のいずれか1項に記載の電界効果トランジスタ。

【請求項12】 ゲート電極としてカーボンナノチューブを用いた事を特徴とする請求項1ないし11のいずれか1項に記載の電界効果トランジスタ。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、非常に高い周波数のデジタル電気信号あるいはアナログ電気信号を制御あるいは増幅するための電界効果トランジスタに関する。

【0002】

【従来の技術】 近年の情報処理や通信などの高速化にともない、100GHz以上の非常に高い周波数のデジタル電気信号あるいはアナログ電気信号を制御あるいは増幅する電子デバイスの需要が高まっている。

2

【0003】 上記の目的に用いられる代表的な電子デバイスとしてGaAs等のIII-V族化合物電界効果トランジスタがある。典型的な電界効果トランジスタの断面の模式図を図6に、上面の模式図を図7に示す。図6および図7において、1は基板、2はチャンネル、3はソース電極、4はドレイン電極、5は絶縁体、6はゲート電極である。チャンネルは一般的に半導体で構成され、チャンネルには電気伝導に寄与する荷電粒子が存在する。荷電粒子は電子あるいは正孔である。

10 【0004】 電界効果トランジスタはゲート電極に入力される電圧信号を、ソース電極あるいはドレイン電極から出力される電流信号に変換する装置である。ソース電極とドレイン電極との間に電圧を加えると、チャンネルに存在する荷電粒子がソース電極とドレイン電極の間を電界方向に従って移動し、ソース電極あるいはドレイン電極から電流信号として出力される。電流信号はチャンネルにおける荷電粒子の密度および速度に比例する。絶縁体を介してチャンネルの上あるいは側面に接したゲート電極に電圧を加えると、チャンネルに存在する荷電粒子の密度が変化するため、ゲート電圧を変化する率により電流信号を変化させる事ができる。

20 【0005】 電界効果トランジスタの動作速度は荷電粒子がチャンネルを走行する時間で決定される。より正確には、チャンネルのうち絶縁体を介してゲート電極に接した部分の長さ(ゲート長)を荷電粒子が走行する時間で決定される。ソース電極とドレイン電極との間の電圧を増加する事によりチャンネルに存在する荷電粒子の走行速度は増大する。しかし、走行速度の増加にともない散乱確率が増加するため、ある一定以上には速度が増大しない。その値を飽和速度という。電界効果トランジスタの動作速度の指標である遮断周波数 $f_t$ は、荷電粒子の飽和速度を $v_s$ 、ゲート長を $l_g$ として、 $f_t = v_s / 2\pi l_g$ で与えられる。

30 【0006】 動作速度を増大、つまり遮断速度を増大させるには、飽和速度を増加するか、あるいはゲート長を減少すればよい。ゲート長はゲート電極に対する微細加工技術によって決定され、現状では0.1 $\mu$ m程度まで減少できる。飽和速度を増加させるには、高い飽和速度を持つ半導体をチャンネルとして用いればよい。現在、ガリウム砒素がよく用いられており、その飽和速度は $1 \times 10^7$ cm/sである。ゲート長を0.1 $\mu$ mとすると、遮断周波数は160GHzとなる。

【0007】

40 【発明が解決しようとする課題】 近年の情報処理や通信などの高速化にともない、ガリウム砒素を材料とする電界効果トランジスタで処理できる周波数よりさらに高い周波数のデジタル電気信号あるいはアナログ電気信号を制御あるいは増幅する電子デバイスが必要となっている。そのため、飽和速度がさらに大きい材料を用いた電界効果トランジスタが必要となる。

(3)

特開2003-17508

3

【0008】

【課題を解決するための手段】本発明は、基板の上に設置されたチャンネルと、チャンネルの始端に接続されたソース電極と、チャンネルの終端に接続されたドレイン電極と、チャンネルの上に設置された絶縁体と、絶縁体を介してチャンネルの上に設置されたゲート電極からなる電界効果トランジスタにおいて、チャンネルがカーボンナノチューブにより構成される事の特徴とする電界効果トランジスタを提供する。

【0009】また、カーボンナノチューブが半導体型であると、さらに効果的である。カーボンナノチューブとして単層カーボンナノチューブあるいは多層カーボンナノチューブのどちらでもよい。

【0010】また、チャンネルに荷電供与体を添加した電界効果トランジスタを提供する。荷電供与体として、アルカリ金属を用いた電界効果トランジスタを提供する。また、ハロゲン分子を用いた電界効果トランジスタを提供する。

【0011】また、カーボンナノチューブをチャンネルとする電界効果トランジスタにおいて、荷電粒子供与体がカーボンナノチューブに内包されている事の特徴とする電界効果トランジスタを提供する。フラーレン類を内包したカーボンナノチューブをチャンネルとする電界効果トランジスタを提供する。

【0012】

【発明の実施の形態】不純物散乱や格子散乱が抑制される事によってカーボンナノチューブの飽和速度は $8 \times 10^7 \text{ cm/s}$ まで達する。これは、ガリウム砒素の8倍に相当する。この材料をチャンネルとする事により1THz以上の過渡周波数を持つ電界効果トランジスタが得られる事を我々は見出した。

【0013】カーボンナノチューブの直径は非常に小さいため、1本の単層カーボンナノチューブに流すことのできる電流には限度があり、最大1 $\mu\text{A}$ 程度である。実用上は電界効果トランジスタの電流信号として1mA程度は必要である。しかし、複数本のカーボンナノチューブを配列したものをチャンネルとして構成する事によって実用に耐えうる電界効果トランジスタを提供できる。配列するカーボンナノチューブは10本から10万本である。

【0014】通常の電界効果トランジスタにおいては、あるゲート電圧（しきい値電圧）を境界としてスイッチング動作をする。その電圧値はチャンネル自身の特性および荷電粒子供与体により決定される。しきい値電圧を調整する事を目的として、チャンネルに荷電粒子供与体を添加することができる。

【0015】通常、荷電粒子供与体には、電子供与体および正孔供与体がある。電子供与体として、ナトリウム、カリウム、ルビジウム、セシウムなどのアルカリ金属が有効である事がわかっている。また、正孔供与体として、塩素、臭素、ヨウ素などのハロゲン原子あるいは

4

ハロゲン分子が有効である事がわかっている。また、分子も荷電粒子供与体として働き、例えばアンモニア、塩化ベンザルコニウムは電子供与体として、酸素分子は正孔供与体として働く。電子供与体を添加するとn型の電界効果トランジスタとして動作し、その添加量を増やすことにより閾値電圧を負方向に調整できる。また、正孔供与体を添加するとp型の電界効果トランジスタとして動作し、その添加量を増やすことにより閾値電圧を正方向に調整できる。

【0016】荷電粒子供与体は、カーボンナノチューブの外部に存在してもよいし、カーボンナノチューブが内包してもよい。荷電粒子供与体がカーボンナノチューブに内包されていると外界からの影響を受けにくくなり、安定した電気特性が得られる。

【0017】以下、図面を参照しつつ本発明の実施例を詳細に説明する。

【0018】図1は、本発明の電界効果トランジスタの第1の実施例の断面構造を示す模式図である。図2は第1の実施例の上面の模式図である。図1および図2において、1は基板、2はチャンネル、3はソース電極、4はドレイン電極、5は絶縁体、6はゲート電極である。

【0019】基板は絶縁性基板あるいは半導体性基板であればよい。絶縁性基板として、たとえば酸化シリコン、窒化シリコン、酸化アルミニウム、酸化チタン、フッ化カルシウム、アクリル樹脂、エポキシ樹脂等の絶縁性樹脂、ポリイミド、テフロン（登録商標）等を用いればよい。半導体基板としては、たとえばシリコン、ゲルマニウム、ガリウム砒素、インジウム銻、炭化シリコン等を用いればよい。基板表面は平坦である事が望ましい。

【0020】図3のように導電性基板の上に絶縁膜を形成した構造をとってもよい。この場合、導電性基板は第2のゲート電極としても作用させる事ができる。

【0021】複数のカーボンナノチューブをソース電極とドレイン電極の間に配列させる事によりチャンネルとする。カーボンナノチューブの合成方法については限定しない。たとえば、レーザーアブレーション法、アーク放電法、化学気相成長法で合成すればよい。また、カーボンナノチューブは単層カーボンナノチューブでもよいし、多層カーボンナノチューブでもよい。チャンネルに配列したカーボンナノチューブの隣接間隔は、0.3 $\mu\text{m}$ から1.0 $\mu\text{m}$ の範囲にあればよい。カーボンナノチューブの配列方向は横方向のみに限定しない。上下方向にも同時に配列していてもよい。

【0022】カーボンナノチューブの両端ハソース電極およびドレイン電極に電気的に接続させる。

【0023】基板上にカーボンナノチューブを配列させる方法としては、自己組織化分子膜を使う方法がある。基板の一部を例えばアミノプロピルエトキシシラン分子膜で覆い、他の部分を例えばヘキサメチルジシラン

(4)

特開2003-17508

5

6

分子膜で覆う。前者の分子膜は正に帯電する性質を持つ。カーボンナノチューブは負に帯電する性質を持つので、クーロン力により選択的に前者の分子膜に吸着する。後者の分子膜にはほとんど吸着しない。電子ビーム露光や光学露光の方法により分子膜のパターン形成が可能なので、ナノチューブを任意の位置に配置することができ、同様に配列する事もできる。

【0024】カーボンナノチューブを操作する方法として光ピンセットを用いる方法がある。これは、光を収束させるとミクロンサイズの粒子が凝集する。この方法を用いてカーボンナノチューブをチャンネルに集積させる方法を用いてもよい。また、ナノチューブは電場の方向に向きやすい性質を用いて、ナノチューブを整列させてもよい。

【0025】ソース電極およびドレイン電極は金属であればよい。たとえば、金、銀、白金、チタン、炭化チタン、タンゲステン、アルミニウム、モリブデン、クロムなどを用いればよい。ソース電極やドレイン電極をカーボンナノチューブの先端に取りつけてもよいし、側面に取りつけてもよい。ソース電極およびドレイン電極は、チャンネルを形成する前に形成してもよいし、チャンネルを形成した後に形成してもよい。また電極形成の際に、よりよい電気的接続を目的として300℃と1000℃の範囲の熱処理を行ってもよい。また、カーボンナノチューブを並列させたレジストを基板上に塗布し、このレジストを露光、現像し、電極を付着させてもよい。

【0026】カーボンナノチューブの上に直接ゲート電極を形成してもかまわないが薄い絶縁膜を介してゲート電極を形成してもよい。絶縁膜としては、酸化シリコン、窒化シリコン、酸化アルミニウム、酸化チタン、フッ化カルシウムなどの無機材料、アクリル樹脂、エポキシ樹脂、ポリイミド、テフロンなどの高分子材料、アミノプロピルエトキシシランなどの自己組織化分子膜などを用いればよい。カーボンナノチューブの側面にはダン

グリングボンドがないため化学的に不活性であり、絶縁体の選択には自由度がある。

【0027】ゲート電極には導体を用いればよい。例えば、金、銀、白金、チタン、炭化チタン、窒化チタン、タンゲステン、ケイ化タンゲステン、窒化タンゲステン、アルミニウム、モリブデン、クロム、多結晶シリコン、あるいはその組み合わせであればよい。

【0028】カーボンナノチューブをゲート電極として用いてもよい。その場合、非常に短いゲート長が得られる。使用するカーボンナノチューブは単層カーボンナノチューブ、多層カーボンナノチューブ、金属内包カーボンナノチューブでよい。金属性のカーボンナノチューブが好ましい。

【0029】図4は、本発明の電界効果トランジスタの第2の実施例の上面を示す模式図である。1は基板、2はチャンネル、3はソース電極、4はドレイン電極、5は絶縁

体、6はゲート電極、7は荷電粒子供与体である。荷電粒子供与体は、カーボンナノチューブに対して電子あるいは正孔を供与する。これによってカーボンナノチューブに存在する荷電粒子の密度を制御する事ができる。

【0030】電子供与体として、ナトリウム、カリウム、ルビジウム、セシウムなどのアルカリ金属を用いればよい。正孔供与体として、塩素、臭素、ヨウ素などのハロゲン原子あるいはハロゲン分子を用いればよい。また、酸素分子、アンモニア、塩化ベンザルコニウムなどの分子を荷電粒子供与体として用いてもよい。

【0031】図5は、本発明の電界効果トランジスタの第3の実施例の上面を示す模式図である。荷電供与体がカーボンナノチューブの内部に存在している。荷電供与体としてフラーレンを用いてよい。たとえば、C60、C70、C76、C78、C82、C84、C92などを用いればよい。また化学修飾されたフラーレンでもよい。またフラーレンがさらに別の原子を内包していてもよい。たとえば、La、Er、Gd、Ho、Nd、Y、Sc、Sc2、Sc3を内包したフラーレンを用いてもよい。これらのフラーレンはともに荷電粒子供与体として有効に作用する。

【0032】カーボンナノチューブに電子あるいは正孔を供給する方法としては、放射線照射および金属蒸着による製造方法を用いることができる。

【0033】

【発明の効果】本発明によれば、従来のIII-V系の化合物電界効果トランジスタと同等のゲート長で飽和速度が非常に大きいカーボンナノチューブによりチャンネルを構成する事ができるので非常に高い周波数でデジタル電気信号あるいはアナログ電気信号を制御あるいは増幅する電界効果トランジスタが実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1の実施例である電界効果トランジスタの断面の模式図。

【図2】 本発明の第1の実施例である電界効果トランジスタの上面の模式図。

【図3】 本発明の第1の実施例において導電性基板の上に絶縁膜を設置した電界効果トランジスタの断面の模式図。

【図4】 本発明の第3の実施例である電界効果トランジスタの上面の模式図。

【図5】 本発明の第4の実施例である電界効果トランジスタの上面の模式図。

【図6】 従来例である電界効果トランジスタの断面の模式図。

【図7】 従来例である電界効果トランジスタの上面の模式図。

【符号の説明】

- 1 基板
- 2 チャンネル
- 3 ソース電極

50

(5)

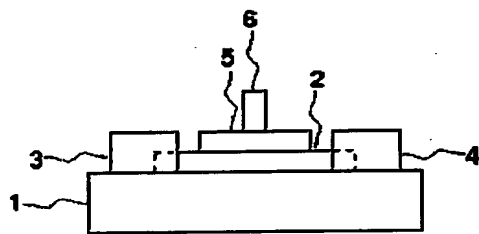
特開2003-17508

- 4 ドレイン電極
- 5 絶縁体
- 6 ゲート電極

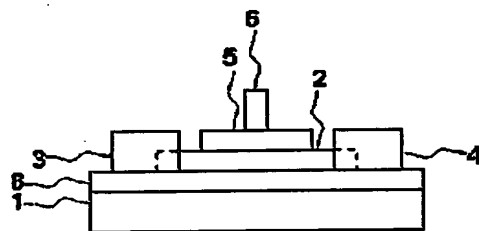
- \* 7 荷電粒子供与体
- 8 絶縁膜

\*

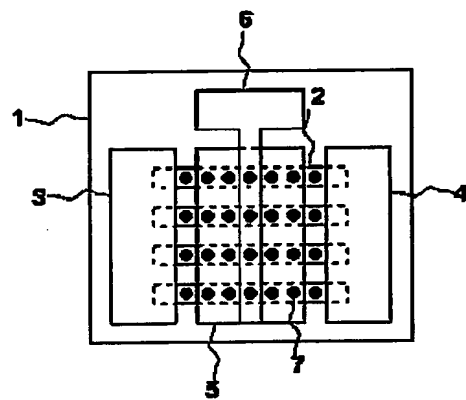
【図1】



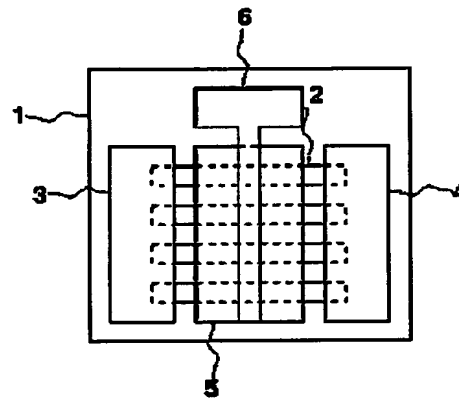
【図3】



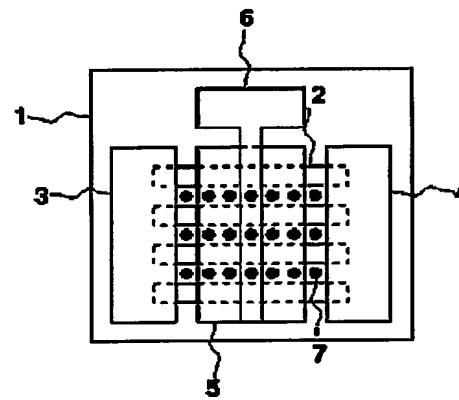
【図5】



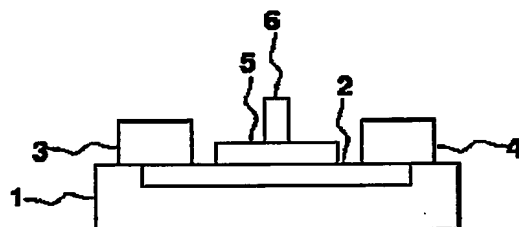
【図2】



【図4】



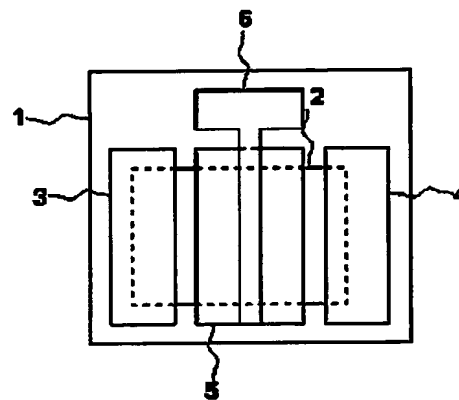
【図6】



(6)

特開2003-17508

【図7】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.

識別記号

F I

ターコード (参考)

H 0 1 L 51/00

F ターム (参考) 5F102 FB10 GB01 GC01 GC02 GD01  
 GD02 GD10 GJ10 GL02 GL08  
 GM02 GR06 GT10  
 5F110 AA01 CC02 DD01 DD05 EE01  
 EE02 EE04 EE29 FF01 FF02  
 FF03 GG01 GG19 GG22 GG41  
 HK02 HK04  
 5F140 AA01 AA07 AC36 BA01 BB09  
 BB01 BB15 BD04 BD05 BD07  
 BD11 BF01 BF03 BF04 BF05  
 BF07 BF08 BJ01 BJ05 BJ07



## \* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] The field-effect transistor characterized by a channel consisting of carbon nanotubes in the field-effect transistor which consists of the channel a charged particle runs, the source field and drain field connected to a part of channel, respectively, and a gate electrode combined with a channel in electromagnetism.

[Claim 2] The field-effect transistor according to claim 1 characterized by the electrical property of a carbon nanotube being a semiconductor mold.

[Claim 3] The field-effect transistor according to claim 1 or 2 characterized by including the case where there is nothing when helicity is in a carbon nanotube at a carbon nanotube, including a monolayer carbon nanotube or a multilayer carbon nanotube.

[Claim 4] A field-effect transistor given in claim 1 characterized by the charged-particle donator being added by the carbon nanotube thru/or any 1 term of 3.

[Claim 5] A charged-particle donator is a field-effect transistor according to claim 4 characterized by being alkali metal.

[Claim 6] A charged-particle donator is a field-effect transistor according to claim 4 characterized by being a halogen atom or a halogen molecule.

[Claim 7] A field-effect transistor given in claim 1 characterized by the carbon nanotube having connoted the charged-particle supply object thru/or any 1 term of 6.

[Claim 8] The field-effect transistor according to claim 7 characterized by the charged-particle donators connoted by the carbon nanotube being fullerene.

[Claim 9] Fullerene is a field-effect transistor according to claim 8 characterized by carrying out chemical modification.

[Claim 10] Fullerene is a field-effect transistor given in either of claims 8 or 9 characterized by having connoted the metal or the molecule.

[Claim 11] A field-effect transistor given in claim 1 characterized by connecting the gate electrode to a channel through an insulator layer thru/or any 1 term of 10.

[Claim 12] A field-effect transistor given in claim 1 characterized by using a carbon nanotube as a gate electrode thru/or any 1 term of 11.

---

[Translation done.]

## \* NOTICES \*

JPO and NCIPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

## DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the field-effect transistor for controlling or amplifying the digital electrical signal or analog electrical signal of a very high frequency.

[0002]

[Description of the Prior Art] It follows on improvement in the speed of information processing in recent years, a communication link, etc., and the need of the electron device which controls or amplifies the digital electrical signal or analog electrical signal 100GHz or more of a very high frequency is increasing.

[0003] There are III-V group compound field-effect transistors, such as GaAs, as a typical electron device used for the above-mentioned object. The mimetic diagram of the cross section of a typical field-effect transistor is shown in drawing 6, and a mimetic diagram on top is shown in drawing 7. For a channel and 3, as for a drain electrode and 5, in drawing 6 and drawing 7, a source electrode and 4 are [ 1 / a substrate and 2 / an insulator and 6 ] gate electrodes. Generally a channel consists of semi-conductors and the charged particle which contributes to electric conduction exists in a channel. A charged particle is an electron or an electron hole.

[0004] A field-effect transistor is equipment which transforms the voltage signal inputted into a gate electrode into the current signal outputted from a source electrode or a drain electrode. If an electrical potential difference is applied between a source electrode and a drain electrode, the charged particle which exists in a channel will move between a source electrode and drain electrodes according to the direction of electric field, and will be outputted as a current signal from a source electrode or a drain electrode. A current signal is proportional to the consistency and rate of a charged particle in a channel. If an electrical potential difference is applied to the gate electrode which touched the channel top or the side face through the insulator, since the consistency of the charged particle which exists in a channel will change, a current signal can be changed by changing gate voltage.

[0005] The working speed of a field-effect transistor is determined by the time amount to which a charged particle runs a channel. It is decided more by the time amount to which a charged particle runs \*\* (gate length) of the part which touched the gate electrode through the insulator among channels that it will be accuracy. The travel speed of the charged particle which exists in a channel increases by increasing the electrical potential difference between a source electrode and a drain electrode. However, since a dispersion probability increases with the increment in a travel speed, a rate does not increase more than [ a certain ] fixed. The value is called saturation velocity. It sets gate length to  $l_g$  by setting saturation velocity of a charged particle to  $v_s$ , and the cut-off frequency  $f_T$  which is the index of the working speed of a field-effect transistor is given by  $f_T = v_s / 2\pi l_g$ .

[0006] What is necessary is to increase saturation velocity or just to decrease gate length, in order for working speed to increase buildup, i.e., cutoff velocity. Gate length is determined by the ultra-fine processing technology over a gate electrode, and can decrease in number to about 0.1 micrometers in the actual condition. What is necessary is just to use a semi-conductor with high saturation velocity as a channel, in order to make saturation velocity increase. Current and gallium arsenide are used well and the saturation velocity is  $1 \times 10^7$  cm/s. If gate length is set to 0.1 micrometers, cut-off frequency will be set to 160GHz.

[0007]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] The electron device which controls or amplifies the digital electrical signal or analog electrical signal of a frequency still higher than the frequency which can be processed by the field-effect transistor made from gallium arsenide is needed with improvement in the speed of information processing in recent years, a communication link, etc. Therefore, the field-effect transistor using an ingredient with still larger saturation velocity is needed.

[0008]

[Means for Solving the Problem] This invention offers the field-effect transistor characterized by constituting a channel with a carbon nanotube in the field-effect transistor which consists of a gate electrode installed on the channel through the channel installed on the substrate, the source electrode connected to the start edge of a channel, the drain electrode connected to the termination of a channel, the insulator installed on the channel, and the insulator.

[0009] Moreover, it is still more effective in a carbon nanotube being a semi-conductor mold. Either a monolayer carbon nanotube or a multilayer carbon nanotube is OK as a carbon nanotube.

[0010] Moreover, the field-effect transistor which added the charge donator to the channel is offered. The field-effect transistor using alkali metal as an electrification donator is offered. Moreover, the field-effect transistor using a halogen molecule is offered.

[0011] Moreover, in the field-effect transistor which uses a carbon nanotube as a channel, the field-effect transistor characterized by the charged-particle donator being connoted by the carbon nanotube is offered. The field-effect transistor which uses as a channel the carbon nanotube which connoted fullerene is offered.

[0012]

[Embodiment of the Invention] The saturation velocity of a carbon nanotube is attained to  $8 \times 10^7$  cm/s by controlling impurity scattering and lattice scattering. This corresponds by 8 times the gallium arsenide. We found out that a field-effect transistor with the cut-off frequency of 1THz or more was obtained by using this ingredient as a channel.

[0013] Since the diameter of a carbon nanotube is very small, there is a limit in the current which can be passed to one monolayer carbon nanotube, and it is about [ a maximum of 1micro ] A. About 1mA is required as a current signal of a field-effect transistor practically. However, the field-effect transistor which can be equal to practical use can be offered by constituting as a channel what arranged two or more carbon nanotubes. The number of the carbon nanotubes to arrange is 100,000 from ten.

[0014] In the usual field-effect transistor, switching operation is carried out bordering on a certain gate voltage (threshold electrical potential difference). The electrical-potential-difference value is determined by the own property and own charged-particle donator of a channel. A charged-particle donator can be added to a channel for the purpose of adjusting a threshold electrical potential difference.

[0015] Usually, there are an electron donor and an electron hole donator as charged-particle donator. As an electron donor, it turns out that alkali metal, such as sodium, a potassium, a rubidium, and caesium, is effective. Moreover, it turns out as an electron hole donator that a halogen atom or halogen molecules, such as chlorine, a bromine, and iodine, are effective. Moreover, a molecule also works as a charged-particle donator, for example, ammonia and a benzalkonium chloride work as an electron donor, and an oxygen molecule works as an electron hole donator. If an electron donor is added, it will operate as a field-effect transistor of n mold, and threshold voltage can be adjusted in the negative direction by increasing the addition. Moreover, if an electron hole donator is added, it will operate as a field-effect transistor of p mold, and threshold voltage can be adjusted in the forward direction by increasing the addition.

[0016] A charged-particle donator may exist in the exterior of a carbon nanotube, and a carbon nanotube may connote it. The carbon nanotube's connotation of the charged-particle donator acquires the electrical property by which it was hard coming to win popularity the effect from the external world, and it was stabilized.

[0017] Hereafter, the example of this invention is explained to a detail, referring to a drawing.

[0018] Drawing 1 is the mimetic diagram showing the cross-section structure of the 1st example of the field-effect transistor of this invention. Drawing 2 is the mimetic diagram of the top face of the 1st example. For a channel and 3, as for a drain electrode and 5, in drawing 1 and drawing 2, a source electrode and 4 are [ 1 / a substrate and 2 / an insulator and 6 ] gate electrodes.

[0019] A substrate should just be an insulating substrate or a semi-conductor nature substrate. What is necessary is just to use insulating resin, such as silicon oxide, silicon nitride, an aluminum oxide, titanium oxide, a calcium fluoride, acrylic resin, and an epoxy resin, polyimide, Teflon (trademark), etc. as an insulator substrate. What is necessary is just to use silicon, germanium, gallium arsenide, indium phosphide, carbonization silicon, etc. as a semi-conductor substrate, for example. The flat thing of a substrate front face is desirable.

[0020] It is very good in the structure which formed the insulator layer on the conductive substrate like drawing 3. In this case, a conductive substrate can be made to act also as 2nd gate electrode.

[0021] It considers as a channel by making two or more carbon nanotubes arrange between a source electrode and a drain electrode. It does not limit about the synthetic approach of a carbon nanotube. For example, what is necessary is just to compound by the laser ablation method, the arc discharge method, and the chemical-vapor-deposition method. Moreover, a monolayer carbon nanotube is sufficient as a carbon nanotube, and a multilayer carbon nanotube is sufficient as it. The contiguity distance of the carbon nanotube arranged to the channel should just be in the range of 10 micrometers from 0.3nm. The array direction of a carbon nanotube is not limited only to a longitudinal direction. You may arrange simultaneously also in the vertical direction.

[0022] It is made to connect with the ends HASOSU electrode and drain electrode of a carbon nanotube electrically.

[0023] As an approach of making a carbon nanotube arranging, the approach using a self-organizing molecular film is on a substrate. Some substrates are covered for example, with an aminopropyl ethoxy silane molecular film, and a bonnet and other parts are covered for example, with a hexamethyldisilazane molecular film. The former molecular film has the property in which it is just charged. Since a carbon nanotube has the property in which it is charged in negative, it sticks to the former molecular film selectively according to Coulomb force. It hardly sticks to the latter molecular film. By the approach of electron beam exposure or optical exposure, since pattern formation of a molecular film is possible, a nanotube can be arranged in the location of arbitration, and it can also arrange similarly.

[0024] There is an approach using a photo pincette as an approach of operating a carbon nanotube. If this completes light, the particle of micron size will condense it. The approach of making a channel accumulating a carbon nanotube using this approach may be used. Moreover, a nanotube may use the sense and a cone property in the direction of electric field, and may align a nanotube.

[0025] A source electrode and a drain electrode should just be metals. For example, what is necessary is just to use gold, silver, platinum, titanium, titanium carbide, a tungsten, aluminum, molybdenum, chromium, etc. A source electrode and a drain electrode may be attached at the head of a carbon nanotube, and you may attach in a side face. Before a source electrode and a drain electrode form a channel, they may be formed, and after forming a channel, they may be formed. Moreover, in the case of electrode formation, the range of 300 degrees C and 1000 degrees C may be heat-treated for the purpose of better electrical installation. Moreover, the resist which diffused the carbon nanotube may be applied on a substrate, this resist may be exposed and developed, and an electrode may be made to adhere.

[0026] Although a direct gate electrode may be formed on a carbon nanotube, a gate electrode may be formed through a thin insulator layer. What is necessary is just to use self-organizing molecular films, such as polymeric materials, such as inorganic materials, such as silicon oxide, silicon nitride, an aluminum oxide, titanium oxide, and a calcium fluoride, acrylic resin, an epoxy resin, polyimide, and Teflon, and an aminopropyl ethoxy silane, etc. as an insulator layer. Since there is no dangling bond in the side face of a carbon nanotube, it is inactive chemically, and there is a degree of freedom in selection of an insulator.

[0027] What is necessary is just to use a conductor for a gate electrode. for example, gold, silver, platinum, titanium, titanium carbide, titanium nitride, a tungsten, and silicification -- a tungsten, a nitriding tungsten, aluminum, molybdenum, chromium, and polycrystalline silicon -- or -- the -- what is necessary is just to combine and come out

[0028] A carbon nanotube may be used as a gate electrode. In that case, very short gate length is obtained. The carbon nanotube to be used is good at a monolayer carbon nanotube, a multilayer carbon nanotube, and a metal connotation carbon nanotube. A metallic carbon nanotube is desirable.

[0029] Drawing 4 is the mimetic diagram showing the top face of the 2nd example of the field-effect transistor of this invention. 1 -- for a source electrode and 4, as for an insulator and 6, a drain electrode and 5 are [ a substrate and 2 / a channel and 3 / a gate electrode and 7 ] charged-particle donators. A charged-particle donator supplies an electron or an electron hole to a carbon nanotube. The consistency of the charged particle which exists in a carbon nanotube is controllable by this.

[0030] What is necessary is just to use alkali metal, such as sodium, a potassium, a rubidium, and caesium, as an electron donor. What is necessary is just to use a halogen atom or halogen molecules, such as chlorine, a bromine, and iodine, as an electron hole donator. Moreover, molecules, such as an oxygen molecule, ammonia, and a benzalkonium chloride, may be used as a charged-particle donator.

[0031] Drawing 5 is the mimetic diagram showing the top face of the 3rd example of the field-effect transistor of this invention. The electrification donator 7 exists in the interior of a carbon nanotube. Fullerene may be used as an electrification donator. For example, what is necessary is just to use C60, C70, C76, C78, C82, C84, C92, etc. Moreover, the fullerene by which chemical modification was carried out is sufficient. Moreover, fullerene may connote still more nearly another atom. For example, the fullerene which connoted La, Er, Gd, Ho, Nd, Y, Sc, Sc2, and Sc3N may be used. Both such fullerene acts effectively as a charged-particle donator.

[0032] As an approach of supplying an electron or an electron hole, radiation irradiation and the manufacture approach by metal vacuum evaporation can be used for a carbon nanotube.

[0033]

[Effect of the Invention] According to this invention, since saturation velocity can constitute a channel from gate length equivalent to

the compound field-effect transistor of the conventional III-V group with a very large carbon nanotube, the field-effect transistor which controls or amplifies a digital electrical signal or an analog electrical signal on a very high frequency is realizable.

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.\*\*\* shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

---

DESCRIPTION OF DRAWINGS

---

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] The mimetic diagram of the cross section of the field-effect transistor which is the 1st example of this invention.

[Drawing 2] The mimetic diagram of the top face of the field-effect transistor which is the 1st example of this invention.

[Drawing 3] The mimetic diagram of the cross section of a field-effect transistor which installed the insulator layer on the conductive substrate in the 1st example of this invention.

[Drawing 4] The mimetic diagram of the top face of the field-effect transistor which is the 3rd example of this invention.

[Drawing 5] The mimetic diagram of the top face of the field-effect transistor which is the 4th example of this invention.

[Drawing 6] The mimetic diagram of the cross section of the field-effect transistor which is the conventional example.

[Drawing 7] The mimetic diagram of the top face of the field-effect transistor which is the conventional example.

[Description of Notations]

- 1 Substrate
- 2 Channel
- 3 Source Electrode
- 4 Drain Electrode
- 5 Insulator
- 6 Gate Electrode
- 7 Charged-Particle Donator
- 8 Insulator Layer

---

[Translation done.]

\* NOTICES \*

JPO and NCIPi are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

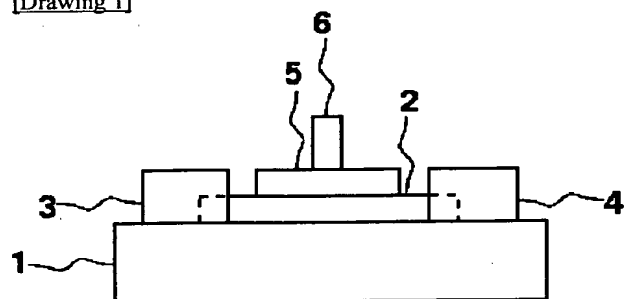
1. This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
2. \*\*\*\* shows the word which can not be translated.
3. In the drawings, any words are not translated.

---

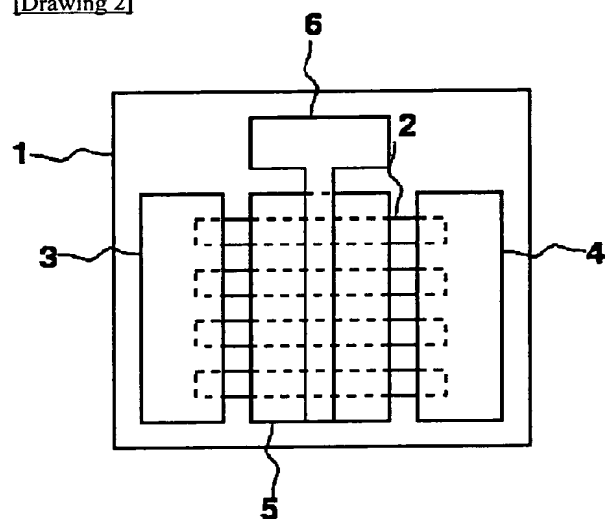
DRAWINGS

---

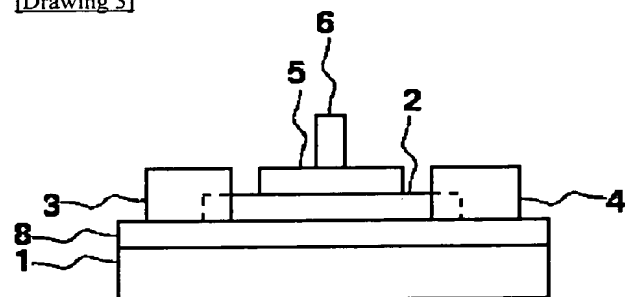
[Drawing 1]



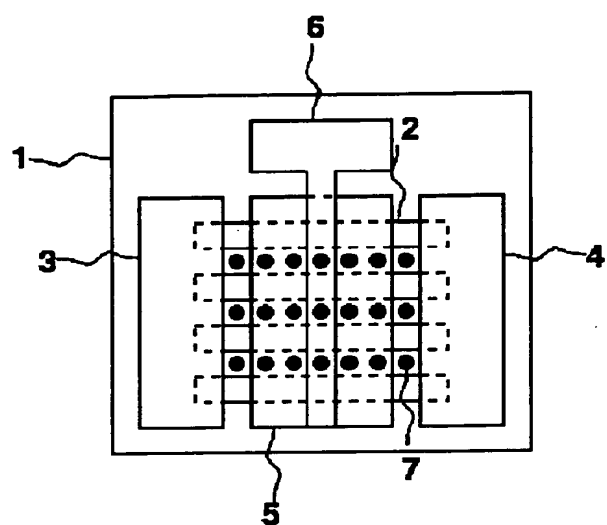
[Drawing 2]



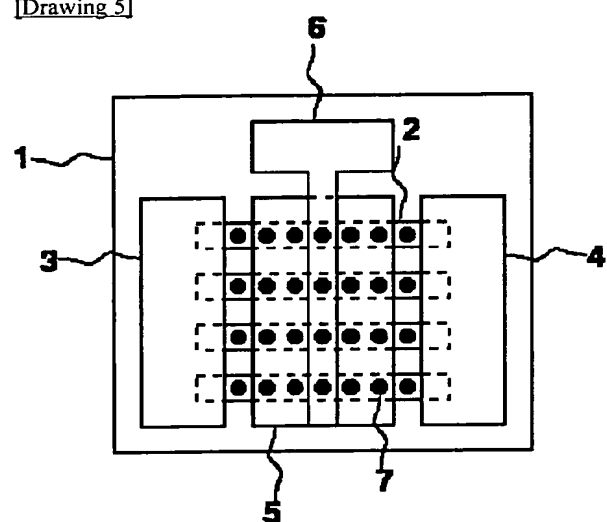
[Drawing 3]



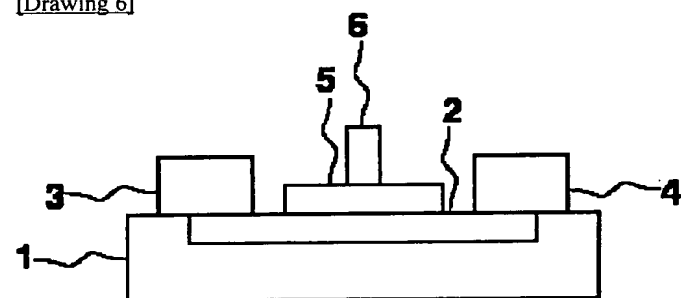
[Drawing 4]



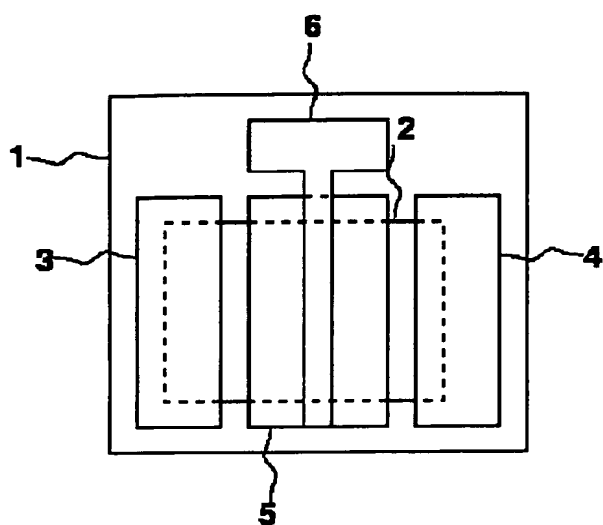
[Drawing 5]



[Drawing 6]



[Drawing 7]



---

[Translation done.]